Trasporto nei Semiconduttori: deriva

Gli elettroni di un SC sottoposti ad un campo elettrico, si muovono come particelle libere dotate di massa inerziale pari alla massa efficace; la densità di corrente che ne deriva è:

$$\vec{J} = -qn\vec{v}$$

Considerando la quantità di moto media, questa dipende in prima analisi dal campo elettrico:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = -q\vec{\mathcal{E}}$$

È necessario però tenere conto delle collisioni che gli elettroni sperimentano nel reticolo:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \left.\frac{d\vec{p}}{dt}\right|_{campo} + \left.\frac{d\vec{p}}{dt}\right|_{coll.} = -q\vec{\mathcal{E}} + \frac{\vec{p}}{\tau_p}$$

Trasporto nei Semiconduttori: deriva

In condizioni stazionare si ha:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0 = -q\vec{\mathcal{E}} + \frac{\vec{p}}{\tau_p}$$

e quindi:

$$\vec{p} = -q\tau_p\vec{\mathcal{E}}$$

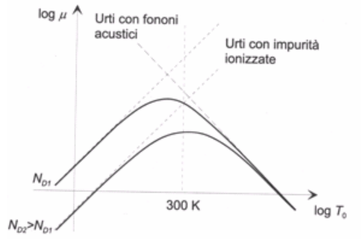
Introducendo la velocità media si ha:

$$\vec{v} = -\frac{q\tau_p}{m_m^*}\vec{\mathcal{E}} = -\mu\vec{\mathcal{E}}$$

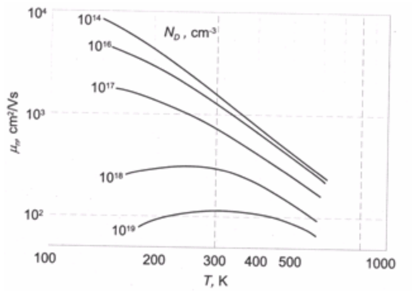
Dove è stata introdotta la mobilità dei portatori

Trasporto nei Semiconduttori : deriva

Andamento teorico della mobilità per bassi campi in funzione di mobilità e drogaggio

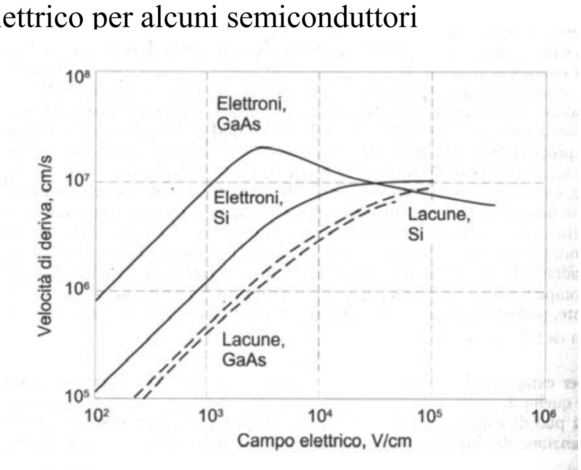


Andamento sperimentale della mobilità per basso campo in funzione della temperatura e del drogaggio



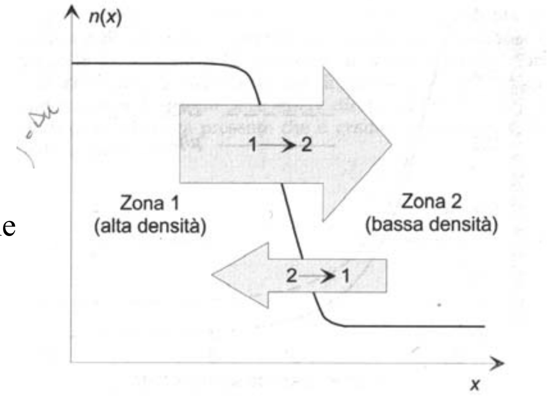
Trasporto nei Semiconduttori: deriva

Andamento della velocità di deriva degli elettroni e lacune in funzione del campo elettrico per alcuni semiconduttori



Trasporto nei Semiconduttori: diffusione

La distribuzione non uniforme degli elettroni e la loro agitazione termica produce un flusso netto di cariche verso le zone a minor concentrazione



N.B. non si ha una migrazione di cariche

Trasporto nei Semiconduttori: diffusione

Questo contributo di corrente è proporzionale al gradiente di concentrazione

$$\vec{J}_{n,d} = qD_n \nabla_n \qquad \vec{J}_{p,d} = -qD_p \nabla_p$$

Il coefficiente ‘D’ è chiamato diffusività.

Relazione di Einstein:

Ricordando che $-q\phi = E$, in condizioni di equilibrio si ha:

$$J_n = 0 = qn\mu \frac{d\phi}{dx} - qD_n \frac{dn}{dx}$$

Trasporto nei Semiconduttori: diffusione

Sostituendo nella precedente la relazione di Schokley, di cui la derivata è:

$$\frac{dn}{dx} = n_i \exp\left(\frac{\phi - \phi_F}{V_T}\right)\frac{1}{V_T}\frac{d\phi}{dx}$$

Dove $V_T = \frac{K_B T}{q}$, si ricava:

$$0 = n_i\left(\mu - \frac{D_n}{V_T}\right)\exp\left(\frac{\phi - \phi_F}{V_T}\right)\frac{d\phi}{dx}$$

Che risulta verificata per:

$$\mu_n = \frac{D_n}{V_T}$$ Relazione di Einstein

Total Current in a Semiconductor

- Total current is the sum of drift and diffusion current:

$$J_n^T = q\mu_n n\mathcal{E} + qD_n\frac{\partial n}{\partial x}$$

$$J_p^T = q\mu_p p\mathcal{E} - qD_p\frac{\partial p}{\partial x}$$

- Rewriting using Einstein's relationship ($D=\mu V_T$),

$$J_n^T = q\mu_n n\left(\mathcal{E} + V_T\frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial x}\right)$$

$$J_p^T = q\mu_p p\left(\mathcal{E} + V_T\frac{1}{p}\frac{\partial p}{\partial x}\right)$$

In the following we will use these equations, combined with Gauss' law, $\nabla\cdot\underline{\mathcal{E}}=Q/\varepsilon$, to calculate currents in a variety of semiconductor devices.

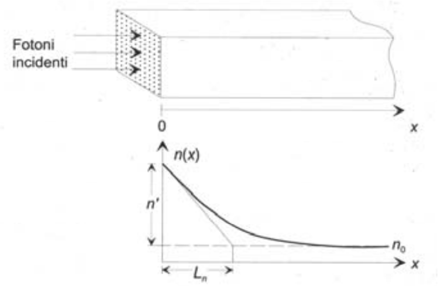
Trasporto nei Semiconduttori: equazione di continuità

Dato un volume di SC, la variazione temporale delle cariche in esso contenute è dovuta al flusso di cariche che passano attraverso al sua superficie e dal tasso di generazione e ricombinazione:

$$\frac{dq}{dt} + \nabla \cdot J + U_q = 0$$

Vediamo un'applicazione notevole di questa relazione.

Supponiamo il campione di semiconduttore sottoposto ad una illuminazione di fotone e lasciato in condizioni di circuito aperto



Trasporto nei Semiconduttori: equazione di continuità

I fotoni generano un eccesso di portatori alla sezione esposta che diffondono nel SC, lasciato in condizioni di circuito aperto.

Utilizzando il modello deriva-diffusione per la corrente, si ha:

$$\frac{d}{dx}\left(-D_n \frac{dn'}{dx}\right) - \frac{n'}{\tau_n} = 0$$

Si tenga presente che in condizioni quasi stazionarie lacune ed elettroni hanno tempi di vita medi, τ, identici. Elaborando la precedente:

$$D_n \frac{d^2 n'}{dx^2} = \frac{n'}{\tau_n} \longrightarrow n'(x) = n(0)\exp\left(-x/L_n\right)$$

Dove si è introdotta la lunghezza di diffusione:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

Trasporto nei Semiconduttori: equazione di continuità

NB: $D_n \neq D_p$ quindi se le concentrazioni *n* e *p* sono identiche le correnti non lo sono e questo comporta la nascita di un campo elettrico ed una corrente di deriva che serve a bilanciare la corrente diffusiva in eccesso.

Scostamento dalla neutralità uniforme nello spazio e tempo-variante.

In questo caso si può scrivere per un SC di tipo N:

$$n(t) = N_D + \hat{n}(t); \quad p(t) = p_0; \quad \phi(t) = \phi_0 + \hat{\phi}(t)$$

Sostituendo $J_n = q\mu_n n \dfrac{d\hat{\phi}}{dx}$ in $\dfrac{dn}{dt} + \nabla \cdot J_n = 0$ si ottiene:

NB: manca il termine diffusivo

Trasporto nei Semiconduttori: equazione di continuità

$$\frac{\partial \hat{n}}{\partial t} \approx -\mu_{n0} N_D \frac{\partial^2 \hat{\phi}}{\partial x^2}$$

Utilizzando anche l'eq. di Poisson $\dfrac{\partial^2 \hat{\phi}}{\partial x^2} = \dfrac{q}{\varepsilon}\hat{n}(t)$, si ricava:

$$\hat{n}(t) = \hat{n}(0)\exp\left(-t/\tau_D\right)$$

Dove si è introdotto il tempo di *rilassamento del dielettrico*:

$$\tau_D = \frac{\varepsilon}{qN_D\mu_n} = \frac{\varepsilon}{\sigma_n}$$

Conclusione: un SC che subisce uno scostamento dalla condizione di equilibrio, vi ritorna con una costante di tempo che è pari τ_D

Trasporto nei Semiconduttori: equazione di continuità

Scostamento dalla neutralità nello spazio.
In questo caso si può scrivere per un SC di tipo N:

$$n(x) = N_D + \hat{n}(x); \quad p(x) = p_0; \quad \phi(x) = \phi_0 + \hat{\phi}(x)$$

Sostituendo $J_n = q\mu_n n \frac{d\hat{\phi}}{dx} + qD_n \frac{\partial n}{\partial x}$ in $\nabla \cdot J_n = 0$ si ottiene:

$$0 = -\mu_n N_D \frac{d^2\hat{\phi}}{dx^2} + D_n \frac{d^2 n}{dx^2}$$

NB: manca il termine derivata nel tempo

Utilizzando l'eq. di Poisson si ha :

$$0 = -\frac{\mu_n N_D}{\varepsilon}\hat{n}(x) + D_n \frac{d^2 n}{dx^2}$$

Trasporto nei Semiconduttori: equazione di continuità

Infine si ottiene:

$$\hat{n}(x) = \hat{n}(0)\exp\left(-x/L_D\right)$$

Dove è stata introdotta la lunghezza di Debye:

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon K_B T_0}{q^2 N_D}}$$

Esempio: per un SC a 300K, drogato di tipo N con N_D=1x10^{16}cm^{-3}, ε_r=10 e mobilità μ_n=1000cm^2/V/s, si ha:

$$L_D = 38 \cdot 10^{-6}\,\text{cm} = 38\ \text{nm} \qquad \tau_D = 0.55\ \text{ps}$$

I portatori di maggioranza diffondono in spazi di dimensione nanometrica